



STUDY ON THE EFFECTS OF LIGNIN EXTRACTED FROM BAI BANG PAPER MILL WASTE ON THE PHYSICO-MECHANICAL PROPERTIES OF 60/70 PENETRATION GRADE BITUMEN

Nguyen Thu Trang*, Hoang Thi Huong Giang, Nguyen Thi Bich Thuy,
Le Nho Thien

University of Transport Technology, No 54 Trieu Khuc Street, Thanh Liet, Hanoi, Vietnam.

ARTICLE INFO

TYPE: Research Article

Received: 18/04/2026

Revised: 13/10/2026

Accepted: 14/10/2026

Published online: 15/10/2026

<https://doi.org/10.47869/tcsj.77.8.4>

* *Corresponding author*

Email: trangnt@utt.edu.vn

Abstract. Valorizing industrial by-products in pavement materials supports green development through a circular economy approach aimed at increasing by-product value and reducing demand for virgin resources. Black liquor from pulp production is a potential source of lignin for use as a bio-based bitumen modifier. This study evaluates the effects of lignin recovered from black liquor at the Bai Bang paper mill on the physical properties and viscosity of 60/70 penetration-grade bitumen to assess changes in binder consistency, softening characteristics, and suitability for pavement construction. Lignin was recovered from black liquor at the Bai Bang paper mill through two-stage fractional acidification at pH 9.3 and 3.0 at 80 °C. Modified binders were prepared by hot mixing with lignin contents ranging from 0% to 20% by weight of the base bitumen. Penetration, softening point, and viscosity were measured, and the relationship between the logarithm of viscosity and temperature was established to inform the selection of mixing and compaction temperatures. At 20% lignin, penetration decreased by 43.33% relative to the base bitumen, while the softening point increased from 47.5 °C to 56.1 °C. Although viscosity increased with lignin addition, all modified binders remained below 3,000 mPa·s at 135 °C. These findings demonstrate the stiffening effect of Bai Bang lignin and its potential as a bio-based bitumen modifier, providing a basis for further research on its performance in pavement applications.

Keywords: Lignin, bitumen, Brookfield viscosity, softening point, penetration.

@ 2026 University of Transport and Communications



NGHIÊN CỨU ẢNH HƯỞNG CỦA LIGNIN CHIẾT TÁCH TỪ CHẤT THẢI NHÀ MÁY GIẤY BÃI BẰNG ĐẾN TÍNH CHẤT CƠ LÝ CỦA NHỰA ĐƯỜNG 60/70

Nguyễn Thu Trang*, Hoàng Thị Hương Giang, Nguyễn Thị Bích Thủy,
Lê Nho Thiện

Trường Đại học Công nghệ Giao thông Vận tải, số 54 Triều Khúc, Thanh Liệt, Hà Nội.

THÔNG TIN BÀI BÁO

CHUYÊN MỤC: Công trình khoa học

Ngày nhận bài: 18/04/2026

Ngày nhận bài sửa: 13/10/2026

Ngày chấp nhận đăng: 14/10/2026

Ngày xuất bản Online: 15/10/2026

<https://doi.org/10.47869/tcsj.77.8.4>

* Tác giả liên hệ

Email: trangnt@utt.edu.vn

Tóm tắt. Tận dụng phụ phẩm công nghiệp trong sản xuất vật liệu mặt đường là một hướng tiếp cận phát triển xanh theo nguyên tắc kinh tế tuần hoàn, nhằm gia tăng giá trị phụ phẩm và giảm nhu cầu sử dụng tài nguyên nguyên sinh. Dịch đen từ quá trình sản xuất bột giấy là nguồn lignin tiềm năng để sử dụng làm chất biến tính nhựa đường có nguồn gốc sinh học. Nghiên cứu đánh giá ảnh hưởng của lignin thu hồi từ dịch đen của Nhà máy Giấy Bãi Bằng đến các tính chất cơ lý và độ nhớt của nhựa đường có độ kim lún 60/70, nhằm làm rõ sự thay đổi độ quán tính, đặc tính hóa mềm và khả năng đáp ứng các yêu cầu thi công mặt đường. Lignin được thu hồi từ dịch đen của Nhà máy Giấy Bãi Bằng bằng phương pháp axit hóa phân đoạn hai giai đoạn tại pH 9,3 và 3,0 ở nhiệt độ 80 °C. Các mẫu nhựa đường biến tính được chế tạo bằng phương pháp trộn nóng với hàm lượng lignin từ 0% đến 20% theo khối lượng nhựa đường nền. Độ kim lún, nhiệt độ hóa mềm và độ nhớt được xác định; quan hệ giữa logarit độ nhớt và nhiệt độ được thiết lập làm cơ sở lựa chọn nhiệt độ trộn và đầm nén. Tại hàm lượng lignin 20%, độ kim lún giảm 43,33% so với nhựa đường nền, trong khi nhiệt độ hóa mềm tăng từ 47,5 °C lên 56,1 °C. Mặc dù độ nhớt tăng khi bổ sung lignin, tất cả các mẫu biến tính đều có độ nhớt dưới 3.000 mPa·s tại 135 °C. Kết quả cho thấy tác dụng làm cứng nhựa đường của lignin Bãi Bằng và tiềm năng sử dụng vật liệu này làm chất biến tính có nguồn gốc sinh học, tạo cơ sở cho các nghiên cứu tiếp theo về hiệu năng ứng dụng trong kết cấu mặt đường.

Từ khóa: Lignin, nhựa đường, độ nhớt Brookfield, nhiệt độ hóa mềm, độ kim lún.

@2026 Trường Đại học Giao thông vận tải

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Chiến lược khử carbon và kinh tế tuần hoàn trong lĩnh vực kỹ thuật giao thông hiện đại đòi hỏi phải giảm thiểu việc khai thác các chất kết dính nhựa đường có nguồn gốc hóa thạch, đồng thời cắt giảm phát thải nhà kính trong vòng đời công trình [1-3]. Nhựa đường là vật liệu có tính nhạy cảm nhiệt cao, dễ bị hư hỏng như lún vệt bánh xe ở nhiệt độ cao và nứt do lão hóa oxy hóa dưới tác động của tia UV và thời tiết [4-6]. Để khắc phục những nhược điểm này, các chất biến tính polymer truyền thống thường được sử dụng, tuy nhiên chúng lại có nhược điểm là giá thành cao và không thân thiện với môi trường. Chính vì vậy, nhu cầu tìm kiếm các chất biến tính có nguồn gốc sinh học, vừa nâng cao hiệu năng kỹ thuật của nhựa đường vừa đáp ứng mục tiêu phát triển bền vững, đang trở thành một hướng nghiên cứu trọng tâm trong lĩnh vực vật liệu giao thông.

Trong bối cảnh đó, Lignin - một polymer sinh học dồi dào thứ hai trên thế giới và là phế phẩm chính từ ngành công nghiệp giấy và ethanol sinh học - đã nổi lên như một giải pháp thay thế đầy hứa hẹn [7,8]. Với cấu trúc mạng lưới vòng thơm polyphenolic phức tạp chứa nhiều nhóm chức hoạt động như hydroxyl và carbonyl, lignin không chỉ đóng vai trò là chất độn gia cường mà còn là một tác nhân chống lão hóa tự nhiên ưu việt [9-11]. Các nghiên cứu gần đây đã chứng minh rằng lignin có khả năng trung hòa các gốc tự do phát sinh trong quá trình oxy hóa bitum, từ đó duy trì độ dẻo và kéo dài tuổi thọ mặt đường [8,12,13]. Nhiều công trình quốc tế đã khẳng định lignin giúp cải thiện đáng kể mô-đun phức hợp (G^*) và độ nhớt của nhựa đường, dẫn đến khả năng kháng lún vệt bánh xe vượt trội [14-16]. Sự tương tác ở cấp độ phân tử giữa các nhóm cực tính của lignin và asphaltene trong bitum tạo nên một hệ thống liên kết hydro bền vững, giúp cải thiện độ ổn định nhiệt của vật liệu [11]. Những kết quả này cho thấy lignin không chỉ là một chất biến tính sinh học tiềm năng về mặt lý thuyết mà còn mở ra cơ hội khai thác các nguồn lignin nội địa phục vụ phát triển vật liệu mặt đường bền vững. Tuy nhiên, hiệu quả biến tính phụ thuộc chặt chẽ vào nguồn gốc thực vật (gỗ cứng, gỗ mềm hoặc rơm rạ) và phương pháp chiết tách (Kraft, Organosolv, hoặc axit hóa) [17-19]. Sự phụ thuộc này dẫn đến các kết quả đánh giá hiệu năng từ những loại lignin thương mại hoặc lignin có nguồn gốc từ hệ thực vật ôn đới không thể được ngoại suy và áp dụng rập khuôn cho các nguồn vật liệu khác. Về bản chất, lignin là một biopolymer vô định hình có cấu trúc đại phân tử cực kỳ phức tạp và không đồng nhất. Tỷ lệ của ba đơn vị monomer cơ sở (guaiacyl, syringyl, p-hydroxyphenyl) cùng mật độ các nhóm chức phân cực hoạt động bề mặt (như phenolic hydroxyl, aliphatic hydroxyl, carbonyl) bị chi phối hoàn toàn bởi chủng loại thực vật đầu vào và mức độ bề gãy các liên kết ether trong quá trình chiết tách [7,8]. Sự biến thiên về khối lượng phân tử, độ đa phân tán và cấu trúc không gian này quyết định trực tiếp đến số lượng vị trí có khả năng hình thành mạng lưới liên kết hydro với các phân đoạn phân cực (asphaltenes và resins) trong bitum [10,11]. Do đó, một hệ nhựa đường sử dụng lignin chiết tách bằng quy trình Kraft từ gỗ mềm ôn đới sẽ thể hiện khả năng tương thích pha, đặc tính lưu biến và cơ chế kháng lão hóa hoàn toàn khác biệt so với lignin thu hồi bằng phương pháp axit hóa phân đoạn từ hỗn hợp nguyên liệu giấy nhiệt đới [9,17]. Việc ngoại suy các thông số kỹ thuật từ những công trình quốc tế áp dụng lên các nguồn lignin đặc thù nội địa sẽ dẫn đến những sai lệch nghiêm trọng về mặt thiết kế cấp phối và kiểm soát nhiệt độ thi công. Mặt khác, tại Việt Nam, dịch kiểm soát thải sinh ra từ quy trình chế biến bột giấy của Nhà

máy Giấy Bãi Bằng tạo ra nguồn trữ lượng lignin kỹ thuật rất lớn, tuy nhiên tiềm năng tái sử dụng nguồn phế phẩm này trong kỹ thuật mặt đường vẫn chưa được lượng hóa thực nghiệm toàn diện. Nhằm khóa lấp khoảng trống khoa học nêu trên, nghiên cứu này tập trung phân lập lignin bằng kỹ thuật axit hóa phân đoạn kiểm soát, sau đó khảo sát có hệ thống các biến thiên về độ kim lún, điểm hóa mềm và độ nhớt Brookfield của chất kết dính 60/70 qua dải hàm lượng biến tính rộng (1-20%). Việc kiểm soát chặt chẽ nhiệt động học phối trộn và xây dựng phương trình biểu kiến nhiệt độ - độ nhớt không chỉ cung cấp thông số đầu vào tin cậy cho công tác sản xuất bê tông nhựa, mà còn đặt tiền đề khoa học vững chắc cho mục tiêu nội địa hóa vật liệu xanh trong xây dựng công trình giao thông.

2. VẬT LIỆU VÀ PHƯƠNG PHÁP THÍ NGHIỆM

2.1. Vật liệu

2.1.1. Nhựa đường

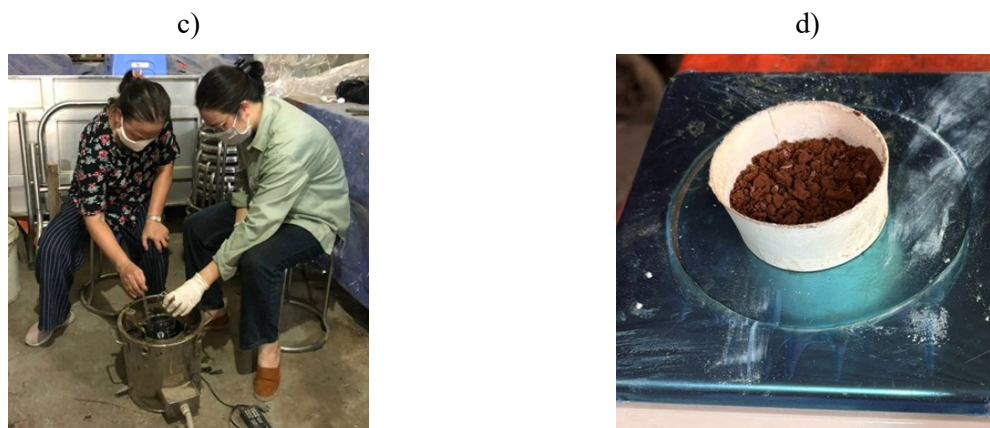
Vật liệu nhựa đường gốc được lựa chọn là nhựa đường thương phẩm phân mác theo độ kim lún 60/70, do Tổng công ty Hóa dầu Petrolimex (PLC) phân phối. Nhằm đảm bảo tính đại diện và độ chính xác của thực nghiệm, các mẫu thử được lấy và nghiệm thu chỉ tiêu chất lượng ban đầu theo đúng danh mục kỹ thuật quy định trong TCVN 7495:2005 trước khi tiến hành phối trộn phụ gia.

2.1.2. Lignin Bãi Bằng

Lignin trong nghiên cứu này được thu hồi từ dung dịch kiềm thải của nhà máy giấy Bãi Bằng thông qua quy trình axit hóa phân đoạn. Quá trình chiết tách được thực hiện trong hệ thống ổn nhiệt sử dụng bể glycerin để duy trì nhiệt độ đồng nhất ở 80°C. Dung dịch axit H₂SO₄ nồng độ 20% được bổ sung nhỏ giọt vào dịch kiềm thải theo hai giai đoạn: giai đoạn đầu điều chỉnh đến pH = 9,3 và giai đoạn kế tiếp hạ xuống pH = 3,0 để tối ưu hóa khả năng kết tủa của các mạch polymer lignin. Sau khi đạt giá trị pH mục tiêu, hỗn hợp được lưu giữ tĩnh trong 24 giờ (qua đêm) để quá trình kết tụ diễn ra hoàn toàn.

Pha rắn sau đó được phân tách bằng phương pháp ly tâm với tốc độ 3000 vòng/phút trong thời gian 10 phút. Sản phẩm lignin thô thu được sau ly tâm tiếp tục được xử lý nhiệt trong tủ sấy ở 100°C cho đến khi đạt khối lượng không đổi, nhằm loại bỏ hoàn toàn độ ẩm tự do và thu được lignin tinh khiết phục vụ cho quá trình biến tính nhựa đường.





Hình 1. Chiết tách lignin từ dung dịch kiềm thải: (a) Dung dịch kiềm thải; (b) Thử độ PH; (c) Quy trình axit hóa; (d) Lignin thu được sau quá trình axit hóa.

2.2. Phương pháp chế tạo mẫu nhựa đường biến tính

Quy trình chế tạo mẫu nhựa đường biến tính lignin được thực hiện bằng phương pháp trộn nóng với thiết bị khuấy cắt cơ học tốc độ cao để đảm bảo sự phân tán đồng nhất của lignin vào trong nhựa đường. Các bước thực hiện cụ thể như sau:

2.2.1. Chuẩn bị vật liệu

Nhựa đường gốc được gia nhiệt trong tủ sấy ở nhiệt độ 150oC cho đến khi đạt trạng thái chảy lỏng hoàn toàn. Lignin sau khi được sấy khô đến khối lượng không đổi được rây qua sàng số 200 (kích thước lỗ 0,075 mm) để loại bỏ các hạt vón cục, đảm bảo kích thước hạt mịn, qua đó tăng diện tích tiếp xúc và khả năng tương thích với nhựa đường.

2.2.2. Quy trình phối trộn

Toàn bộ quá trình trộn được thực hiện trong một thiết bị ổn nhiệt để duy trì nhiệt độ hỗn hợp ở mức $150 \pm 5^{\circ}\text{C}$. Nhiều nghiên cứu đã chỉ ra rằng lignin bắt đầu xảy ra các phản ứng phân hủy nhiệt đáng kể khi vượt quá 170oC - 180oC [8]. Do đó, duy trì mức nhiệt 150oC là giải pháp an toàn để bảo tồn cấu trúc polymer và các nhóm chức hoạt động (hydroxyl, carbonyl) của lignin. Nhiệt độ này giúp hạn chế tối đa quá trình oxy hóa nhiệt của nhựa đường gốc trong suốt quá trình chế tạo mẫu [6].

Quy trình gồm ba giai đoạn chính:

Giai đoạn nạp mẫu: Nhựa đường lỏng được rót vào bình trộn. Cánh khuấy được khởi động ở tốc độ thấp (khoảng 500 vòng/phút). Lignin được thêm từ từ vào nhựa đường theo các tỷ lệ thiết kế (1%, 2%, 5%, 10%, và 20% theo khối lượng nhựa đường gốc) để tránh hiện tượng vón cục cục bộ.

Giai đoạn khuấy trộn tốc độ cao: Sau khi đã nạp đủ lượng Lignin, tốc độ cánh khuấy được tăng lên và duy trì ở mức 1500 vòng/phút trong thời gian 30 phút. Lignin chiết tách thường có xu hướng vón cục do liên kết hydro liên phân tử mạnh. Tốc độ 1500 vòng/phút tạo ra lực cắt đủ lớn để phá vỡ các cụm hạt bị vón, giúp lignin phân tán đồng đều trong nền nhựa [5,15]. Tốc độ này phù hợp với các thiết bị khuấy cơ học tiêu chuẩn trong phòng thí nghiệm, đảm bảo tính ổn định của dòng chảy nhựa đường mà không gây ra hiện tượng xâm thực khí quá mức ở các hàm lượng phụ gia cao (10-20%) [19].

Theo các nghiên cứu về động học của nhựa đường biến tính polymer sinh học, khoảng thời gian từ 30 đến 60 phút là cần thiết để đạt được trạng thái cân bằng lưu biến [10,14]. Thời

gian 30 phút cho phép các nhóm cực tính của lignin tương tác và hình thành mạng lưới liên kết vật lý với các phân đoạn asphaltene trong nhựa đường. Khoảng thời gian này được chứng minh là đủ để đạt được sự đồng nhất tối ưu mà không gây ra hiện tượng lão hóa ngắn hạn cho hỗn hợp [11,13].

Giai đoạn ổn định: Sau khi kết thúc quá trình khuấy cắt, hỗn hợp được duy trì ở tốc độ thấp (300 vòng/phút) trong 10 phút để loại bỏ các bọt khí phát sinh trong quá trình trộn, giúp cấu trúc vật liệu ổn định trước khi thực hiện các thí nghiệm đánh giá.



Hình 2. Trộn tạo mẫu nhựa đường biến tính lignin.

2.2.3. Bảo quản mẫu

Mẫu nhựa đường biến tính sau khi chế tạo được rót ngay vào các khuôn mẫu thí nghiệm (thí nghiệm độ kim lún, nhiệt độ hóa mềm) hoặc cốc đo độ nhớt. Trong trường hợp chưa thí nghiệm ngay, mẫu được lưu trữ trong hộp kín, tránh ánh nắng trực tiếp và chỉ được tái gia nhiệt tối đa một lần để đảm bảo không xảy ra hiện tượng lão hóa nhiệt do gia nhiệt nhiều lần.

2.3. Phương pháp thí nghiệm chỉ tiêu cơ lý

2.3.1. Phương pháp thí nghiệm xác định độ kim lún

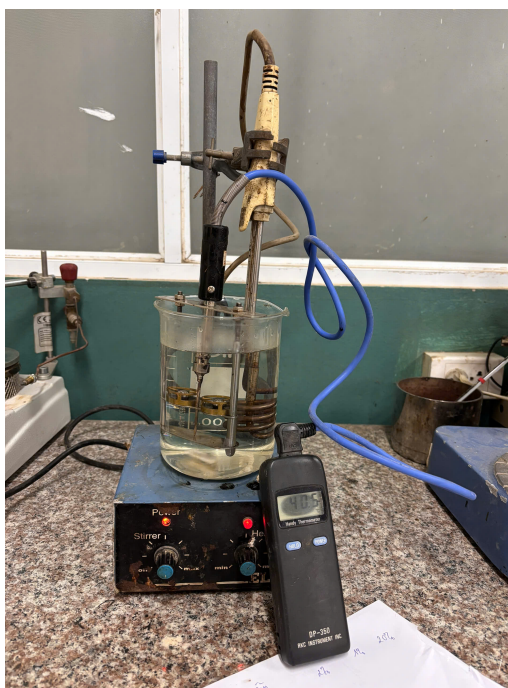
Độ quán tính của mẫu nhựa đường gốc và nhựa đường biến tính lignin được đánh giá thông qua chỉ tiêu độ kim lún. Quy trình thực hiện tuân thủ các tiêu chuẩn kỹ thuật hiện hành bao gồm: TCVN 7495:2005, ASTM D5, và AASHTO T49. Thí nghiệm được triển khai tại Phòng thí nghiệm LAS-XD72 - Trường Đại học Công nghệ Giao thông Vận tải, đảm bảo các điều kiện chuẩn về thiết bị và môi trường thử nghiệm.



Hình 3. Thí nghiệm độ kim lún.

2.3.2. Phương pháp thí nghiệm xác định nhiệt độ hóa mềm

Độ bền nhiệt và khả năng kháng biến dạng dẻo ở nhiệt độ cao của chất kết dính gia cường lignin được đánh giá thông qua chỉ tiêu nhiệt độ hóa mềm, sử dụng phương pháp dụng cụ vòng và bi. Về mặt cơ học vật liệu, điểm hóa mềm phản ánh giới hạn chuyển pha từ trạng thái quánh sang trạng thái nhớt; giá trị này tăng đồng nghĩa với việc cải thiện độ cứng và hạn chế hiện tượng hằn lún vết bánh xe khi mặt đường chịu tác động của tải trọng trùng phục dưới nền nhiệt lớn. Toàn bộ quy trình thử nghiệm được thực hiện nghiêm ngặt theo các tiêu chuẩn TCVN 7497:2005, ASTM D36, và AASHTO T53 tại Phòng thí nghiệm LAS-XD72 - Trường Đại học Công nghệ Giao thông Vận tải.



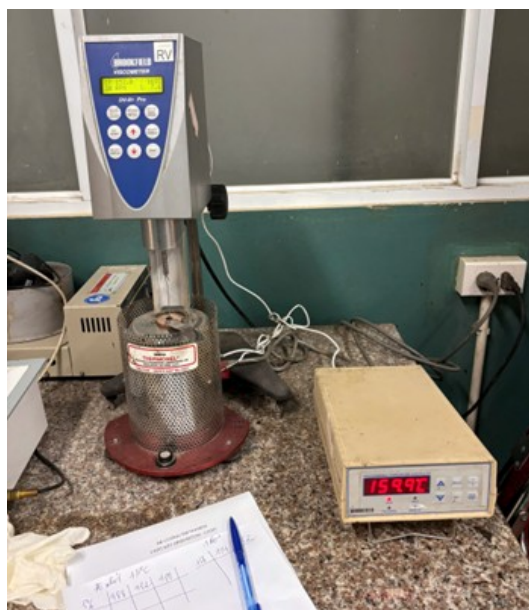
Hình 4. Thí nghiệm nhiệt độ hóa mềm.

2.3.3. Phương pháp thí nghiệm độ nhớt bằng nhớt kế quay

Độ nhớt động lực học của chất kết dính biến tính lignin được xác định bằng máy đo độ nhớt quay Brookfield. Chỉ tiêu này đóng vai trò quyết định trong việc đánh giá tính công tác, khả năng bơm và xác định phạm vi nhiệt độ trộn, lu lèn tối ưu cho hỗn hợp bê tông nhựa.

Thử nghiệm được thực hiện bằng cách đo mô-men xoắn cần thiết để duy trì tốc độ quay không đổi của một trục quay hình trụ nhúng trong mẫu nhựa đường lỏng ở nhiệt độ kiểm soát. Trong nghiên cứu này, độ nhớt được thu thập tại hai mức nhiệt độ phổ biến (135oC và 160oC) nhằm xây dựng giản đồ tương quan nhiệt độ - độ nhớt.

Các thao tác kỹ thuật tuân thủ nghiêm ngặt khung tiêu chuẩn AASHTO T316 song hành cùng ASTM D4402, thực hiện trực tiếp tại cơ sở thí nghiệm LAS-XD72 thuộc Trường Đại học Công nghệ Giao thông Vận tải.

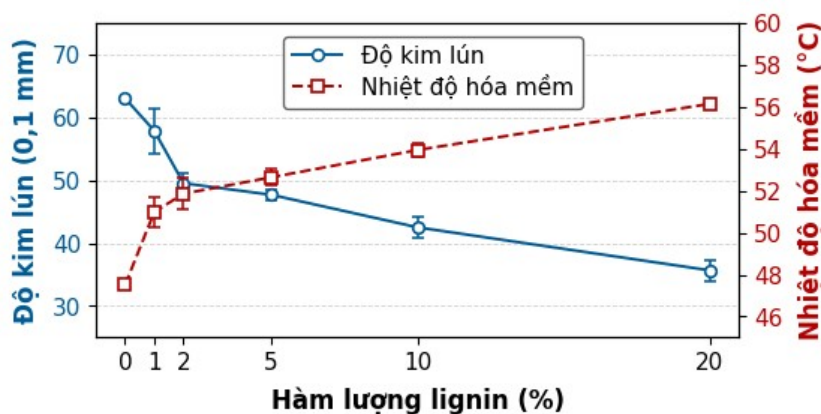


Hình 5. Thí nghiệm độ nhớt quay Brookfield.

4. KẾT QUẢ THÍ NGHIỆM VÀ THẢO LUẬN

4.1. Kết quả thí nghiệm nhiệt độ hòa mềm và độ kim lún

Kết quả thực nghiệm về độ kim lún và điểm hóa mềm của chất kết dính được trình bày tại Hình 6. Qua số liệu thực nghiệm, có thể thấy sự thay đổi các chỉ tiêu cơ lý cơ bản khi hàm lượng lignin bổ sung thay đổi theo quy luật biến tính vật liệu theo hướng gia tăng độ cứng và độ ổn định nhiệt.



Hình 6. Kết quả thí nghiệm độ kim lún và nhiệt độ hóa mềm của mẫu nhựa đường biến tính lignin và nhựa đường 60/70 đối chứng.

Về số liệu thử nghiệm độ kim lún, trị số được ghi nhận với mức sụt giảm khi nồng độ lignin được điều chỉnh lũy tiến từ 0% lên 20%. Cụ thể, mẫu nhựa đối chứng có độ kim lún là 63 (0,1 mm), nhưng khi bổ sung 20% lignin, giá trị này chỉ còn 35,7 (0,1 mm), tương ứng với mức sụt giảm 43,33% so với ban đầu. Đáng chú ý, tại các hàm lượng thấp (1%, 2% và 5%), tốc độ sụt giảm độ kim lún diễn ra khá đều đặn, giảm lần lượt còn 57,8; 49,5 và 47,7 (0,1mm), cho thấy sự phân tán và tương tác bước đầu của các hạt lignin trong nền nhựa đường. Tuy nhiên, khi hàm lượng lignin vượt ngưỡng 10%, giá trị độ kim lún giảm sâu xuống còn 42,5

(0,1 mm), minh chứng cho sự hình thành rõ rệt của một mạng lưới liên kết polymer dày đặc trong nền bitum. Sự sụt giảm này được luận giải bởi vai trò của lignin như một chất độn gia cường trong cấu trúc keo của nhựa đường. Lignin là một polymer tự nhiên có cấu trúc mạch vòng thơm bền vững và sở hữu các nhóm chức phân cực cao [5,19]. Khi phân tán vào nhựa đường, các hạt lignin hấp thụ một phần thành phần dầu nhẹ (maltenes), làm tăng tỷ trọng tương đối của pha rắn (asphaltenes) và tạo ra một ma trận chất kết dính đặc chắc hơn. Lực ma sát nội tại phát sinh giữa các hạt lignin và pha lỏng nhựa đường đã hạn chế sự dịch chuyển tự do của các mạch phân tử, từ đó làm tăng đáng kể độ quán tính và độ cứng của vật liệu [13,20]. Quy luật thực nghiệm này thể hiện sự nhất quán cao với các công bố của Asad và Albayati (2024) [20] khi khảo sát trên hệ nhựa đường đối với lignin nguồn gốc gỗ, đồng thời khẳng định hiệu quả gia cường mạnh mẽ của lignin chiết tách từ nhà máy giấy Bãi Bằng.

Song song với sự gia tăng độ cứng, nhiệt độ hóa mềm của các mẫu nhựa đường biến tính lignin cũng ghi nhận sự cải thiện ấn tượng, tăng từ 47,5°C (mẫu đối chứng) lên mức 56,1°C (mẫu chứa 20% lignin). Khảo sát tại các tỷ lệ pha trộn trung gian, nhiệt độ hóa mềm có sự gia tăng ổn định: đạt 51°C ở 1%; 51,9°C ở 2% và tăng lên 53,9°C ở tỷ lệ 10%. Sự cải thiện liên tục này khẳng định lignin không chỉ đơn thuần là chất độn vật lý mà còn tham gia vào quá trình cải thiện cấu trúc nhiệt của nhựa đường.

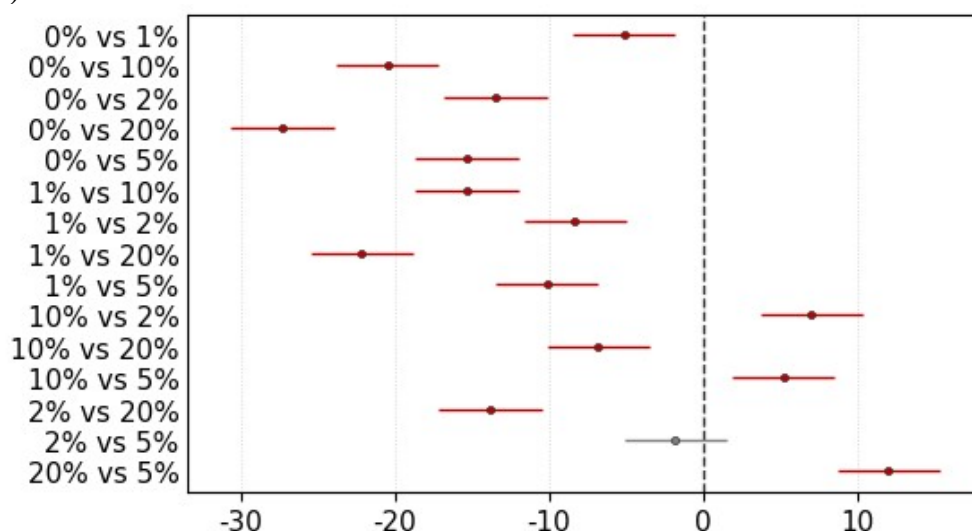
Về mặt cơ chế, cấu trúc polymer của lignin vốn có tính ổn định nhiệt rất cao; các nhóm chức hoạt động như hydroxyl (-OH) và carbonyl (-C=O) trên bề mặt lignin hình thành các liên kết hydro và tương tác tĩnh điện với các nhóm phân cực trong nhựa đường, tạo nên một "khung xương" ổn định nhiệt bên trong cấu trúc vật liệu [11,19]. Mạng lưới liên kết này giúp nhựa đường duy trì trạng thái bán rắn tốt hơn dưới tác động của nhiệt độ cao, làm dịch chuyển điểm nhiệt độ hóa mềm về vùng nhiệt độ lớn hơn [4,15].

Đối chứng với các nghiên cứu trên thế giới, giá trị nhiệt độ hóa mềm 56,1°C đạt được ở hàm lượng 20% đã góp phần nâng cao đáng kể dải nhiệt độ làm việc hữu ích của chất kết dính. Việc cải thiện nhiệt độ hóa mềm có tác động trực tiếp đến khả năng kháng biến dạng dẻo của hỗn hợp bê tông nhựa [21]. So với các nghiên cứu sử dụng lignin từ phế phẩm nông nghiệp như rơm rạ [17], lignin chiết tách từ gỗ của nhà máy Bãi Bằng cho thấy sự cải thiện độ ổn định nhiệt đồng đều và ổn định hơn. Điều này khẳng định rằng quy trình chiết tách bằng axit hóa hai giai đoạn phối hợp với phương pháp trộn nóng cường bức đã tạo ra sự tương thích lý hóa tốt giữa lignin và nhựa đường gốc, mở ra triển vọng ứng dụng nguồn phụ phẩm này trong việc chế tạo các loại mặt đường nhựa có khả năng chống lún vệt bánh xe vượt trội trong điều kiện khí hậu nóng ẩm tại Việt Nam.

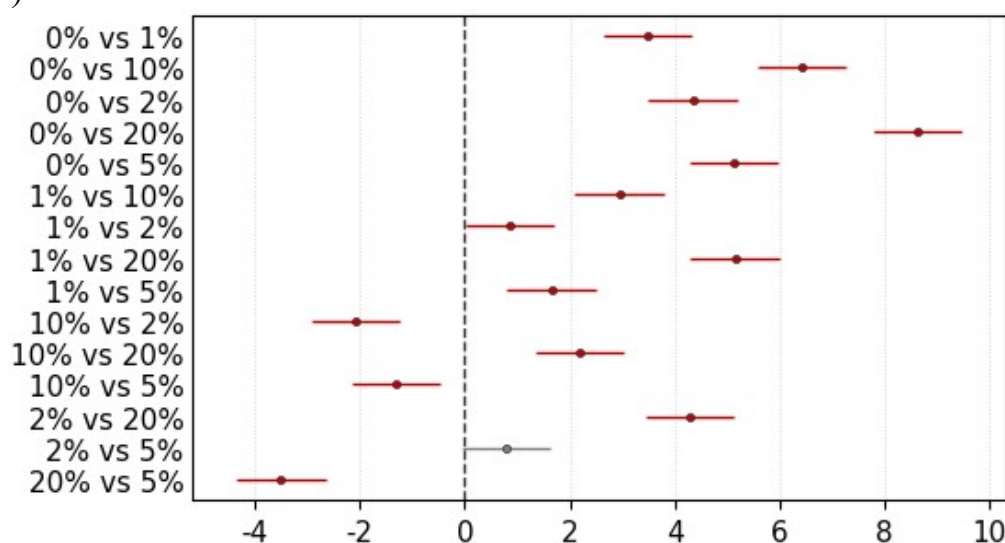
Phân tích phương sai ANOVA với mức ý nghĩa $\alpha=0,05$, phân tích hậu định (post-hoc) theo phương pháp Tukey's HSD sai số các cặp so sánh 5%, khảo sát mức độ ảnh hưởng của tỷ lệ lignin đến độ kim lún và nhiệt độ hóa mềm của các mẫu nhựa đường biến tính lignin cho thấy có sự ảnh hưởng đáng kể của tỷ lệ lignin đến giá trị độ kim lún và nhiệt độ hóa mềm. Hình 7 biểu diễn kết quả so sánh từng cặp theo các tỷ lệ lignin. Kết quả phân tích phương sai chỉ ra, việc bổ sung lignin ngay từ hàm lượng thấp (1%) đã tạo ra sự khác biệt cơ lý có ý nghĩa thống kê so với bitum gốc (0%). Điều này cho thấy trong điều kiện chế bị mẫu với một tỷ lệ lignin rất nhỏ đã cải thiện tính chất cơ lý cơ bản của nhựa đường. Đáng chú ý, trên toàn bộ tỷ lệ khảo sát, cặp hàm lượng 2% và 5% là trường hợp duy nhất không cho thấy sự khác biệt có ý nghĩa thống kê đối với cả độ kim lún và nhiệt độ hóa mềm (đoạn thẳng màu xám cắt qua trục tham chiếu 0). Hiện tượng này phản ánh một đặc tính vi cấu trúc quan trọng của hệ vật liệu: dải nồng độ từ 2% đến 5% đóng vai trò như một "vùng chuyển tiếp". Tại đây, lượng lignin đưa vào đã vượt qua mức tương tác bề mặt đơn lẻ ban đầu nhưng chưa đủ khối lượng

tới hạn để bảo hòa và hình thành một mạng lưới liên kết polymer ba chiều đột biến. Trạng thái cân bằng tạm thời này bị phá vỡ hoàn toàn khi hàm lượng tiếp tục tăng lên mức 10% và 20%; tại các mức này, sự khác biệt trở nên rất rõ rệt và đạt mức ý nghĩa thống kê cao, củng cố giả thuyết về sự hình thành mạng lưới liên kết hydro dày đặc làm tăng đáng kể độ quánh và độ bền nhiệt của chất kết dính.

a)



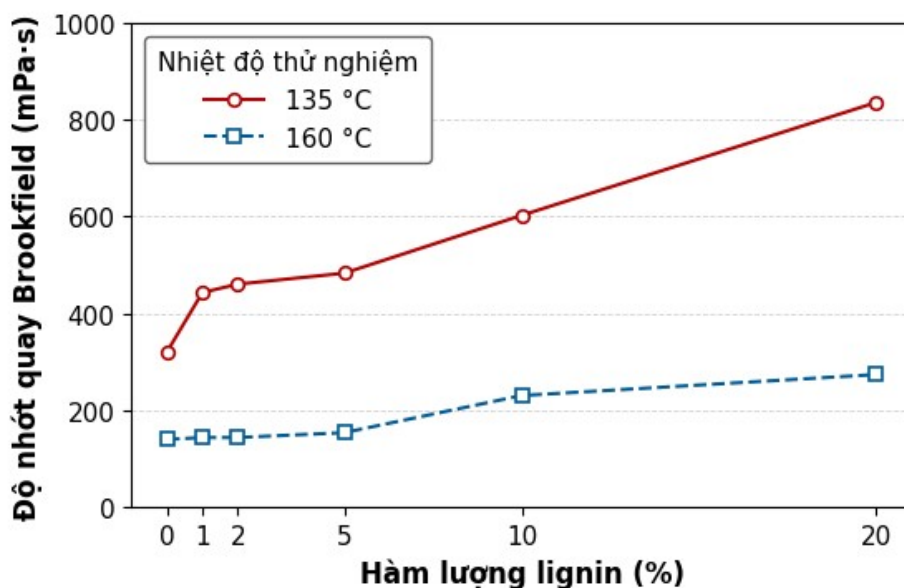
b)



Hình 7. Phân tích phương sai và hậu định độ kim lún (a), nhiệt độ hóa mềm của mẫu nhựa đường 60/70 và nhựa đường biến tính lignin theo tỉ lệ lignin.

4.2. Kết quả thí nghiệm độ nhớt quay

Độ nhớt động lực học là chỉ tiêu then chốt để đánh giá tính công tác và quyết định quy trình công nghệ trong sản xuất, thi công bê tông nhựa. Hình 8 trình bày mối tương quan giữa logarit độ nhớt và nhiệt độ khảo sát (135°C và 160°C) cho các mẫu nhựa đường biến tính lignin.



Hình 8. Kết quả thí nghiệm độ nhớt quay của mẫu nhựa đường biến tính lignin và nhựa đường 60/70 đối chứng.

Kết quả thực nghiệm cho thấy sự gia tăng hàm lượng lignin dẫn đến việc tăng độ nhớt của chất kết dính ở mọi cấp nhiệt độ. Ở hàm lượng lignin thấp (1%, 2% và 5%), tại 135°C, giá trị độ nhớt lần lượt đạt 443,3 mPa.s; 460,7 mPa.s và 483,3 mPa.s, tương ứng với mức tăng từ 38% đến 50% so với nhựa gốc (320,7 mPa.s). Trong giai đoạn này, các hạt lignin đóng vai trò chủ yếu là các hạt độn phân tán đơn lẻ, bắt đầu tạo ra các tương tác bề mặt với các hợp chất cực tính trong bitum nhưng chưa làm thay đổi hoàn toàn bản chất dòng chảy của hệ thống.

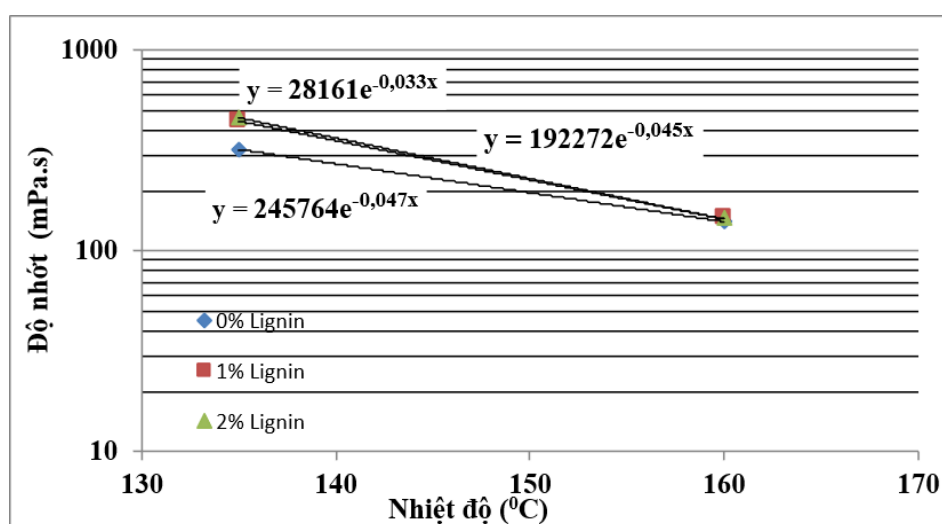
Sự chuyển biến mạnh mẽ nhất xảy ra khi hàm lượng lignin vượt ngưỡng 10% và đạt cực đại ở 20%. Tại tỷ lệ 10%, độ nhớt đạt 602,7 mPa.s và tăng vọt lên 836,0 mPa.s ở tỷ lệ 20%. Tốc độ gia tăng đột ngột này cho thấy khi nồng độ lignin đủ lớn, các hạt polymer sinh học không còn tồn tại độc lập mà bắt đầu tương tác xuyên suốt để hình thành một cấu trúc mạng lưới liên kết trong nền nhựa đường. Cấu trúc này làm gia tăng đáng kể nội lực ma sát và sức kháng cắt của chất kết dính, tương tự như cơ chế của các loại polymer nhiệt dẻo thông thường [5,22].

Đáng chú ý, xu hướng gia tăng này diễn ra đồng nhất ở cả hai mức nhiệt độ khảo sát, nhưng sự chênh lệch giữa các tỷ lệ ở 160°C thu hẹp đáng kể so với ở 135°C. Điều này khẳng định rằng mặc dù lignin nồng độ cao (20%) làm nhựa đường đặc hơn đáng kể ở nhiệt độ làm việc, nhưng tính linh động của nó vẫn được duy trì tốt ở nhiệt độ cao. Tất cả các mẫu có độ nhớt đều duy trì giá trị dưới ngưỡng 3000 mPa.s đảm bảo tính công tác tốt cho hỗn hợp [23]. Đây là một đặc tính kỹ thuật quan trọng, cho phép cải thiện khả năng chống biến dạng dẻo của mặt đường ở nhiệt độ cao mà không gây khó khăn quá mức cho công tác bơm hút và trộn phủ cốt liệu tại trạm trộn [1,11].

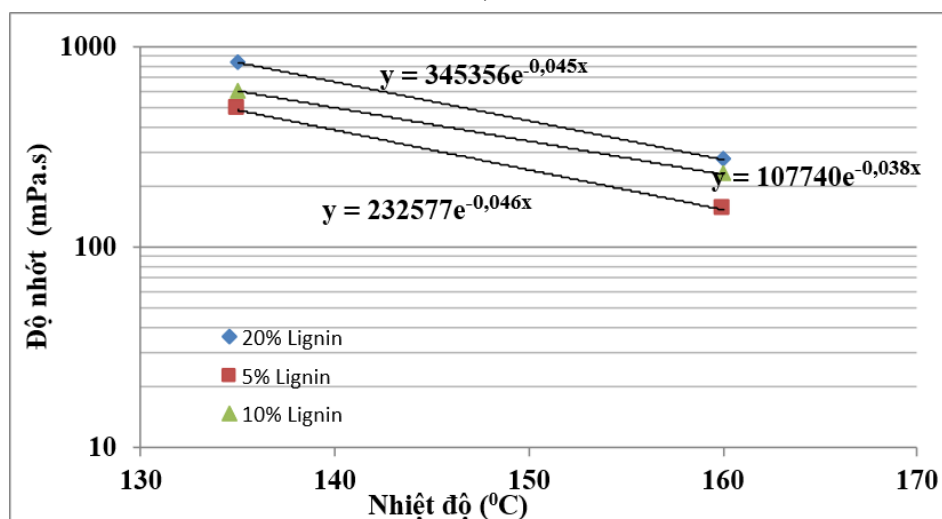
Để xác định các thông số kỹ thuật cho quá trình thi công, nghiên cứu đã thiết lập các phương trình hồi quy tuyến tính dạng $\log(\eta) = ax + b$ (với η là độ nhớt và x là nhiệt độ) cho từng loại mẫu (Hình 9). Dựa trên quy định của Asphalt Institute [24], nhiệt độ trộn và đầm nén được xác định tại các dải độ nhớt tương ứng là $0,17 \pm 0,02$ Pa.s và $0,28 \pm 0,03$ Pa.s được trình bày trong Bảng 1.

Bảng 1. Tổng hợp khoảng nhiệt độ trộn và đầm nén của hỗn hợp bê tông nhựa sử dụng nhựa đường biến tính lignin.

Hàm lượng Lignin	Khoảng nhiệt độ trộn (°C) (Độ nhớt: 170 ± 20 mPa.s)	Khoảng nhiệt độ đầm nén (°C) (Độ nhớt: 280 ± 30 mPa.s)
0% (Bitum gốc)	150,8 - 157,9	136,0 - 142,5
1%	154,1 - 159,4	143,2 - 148,0
2%	154,0 - 159,1	143,5 - 148,2
5%	155,2 - 160,3	144,5 - 149,2
10%	164,9 - 171,0	152,2 - 157,8
20%	168,0 - 173,3	157,1 - 161,9



a)



b)

Hình 9. Biểu đồ quan hệ độ nhớt - nhiệt độ của các mẫu nhựa đường biến tính lignin và nhựa đường 60/70 đối chứng.

Kết quả tính toán cho thấy khi hàm lượng lignin tăng, dải nhiệt độ thi công có xu hướng dịch chuyển về phía vùng nhiệt độ cao hơn. Cụ thể, nhiệt độ đầm nén tối ưu của mẫu nhựa thường là khoảng 142,48°C, trong khi mẫu nhựa biến tính sử dụng 20% lignin đòi hỏi mức nhiệt lên tới 162°C. Sự gia tăng nhiệt độ thi công này là hệ quả tất yếu của quá trình "cứng hóa" nhựa đường do lignin gây ra. Tuy nhiên, mức tăng nhiệt độ này vẫn nằm trong giới hạn kiểm soát của các trạm trộn bê tông nhựa nóng thông thường và không gây ra nguy cơ lão hóa nhiệt nghiêm trọng cho chất kết dính. Việc xác định chính xác dải nhiệt độ này giúp tối ưu hóa quá trình lu lèn, đảm bảo độ chặt và chất lượng khai thác lâu dài cho mặt đường nhựa sử dụng phụ gia lignin [11,13].

5. KẾT LUẬN

Dựa trên các kết quả thực nghiệm và phân tích chuyên sâu, nghiên cứu đưa ra các kết luận chính sau:

Quy trình chiết tách bằng phương pháp axit hóa phân đoạn hai giai đoạn (tại 80°C) cho phép thu hồi hiệu quả lignin từ dịch kiềm đen của nhà máy giấy Bãi Bằng. Kết quả này cung cấp một nguồn vật liệu sinh học nội địa ổn định, giàu tiềm năng để ứng dụng làm chất biến tính nâng cao chất lượng nhựa đường.

Lignin thể hiện vai trò gia cường rõ rệt, làm tăng độ cứng và cải thiện đáng kể độ bền nhiệt của chất kết dính. Kết quả phân tích thống kê khẳng định sự thay đổi tính chất cơ lý cơ bản đạt mức ý nghĩa thống kê cao ($p < 0,05$) ngay từ hàm lượng 1%. Đặc biệt ở mức 20%, nhiệt độ hóa mềm đạt tối đa 56,1°C, cho thấy tiềm năng vượt trội trong việc nâng cao khả năng kháng hàn lún vệt bánh xe ở điều kiện nhiệt độ cao.

Độ nhớt Brookfield của chất kết dính nhựa đường biến tính lignin tăng tỷ lệ thuận với hàm lượng lignin do sự hình thành mạng lưới vi cấu trúc. Tuy nhiên, toàn bộ các mẫu khảo sát đều đáp ứng giới hạn độ nhớt bơm trộn tiêu chuẩn (< 3000 mPa.s), qua đó đảm bảo tính công tác và khả năng thi công thuận lợi.

Thông qua phương trình biến thiên độ nhớt - nhiệt độ, dải nhiệt độ trộn (đạt ngưỡng 170 ± 20 mPa.s) và đầm nén (đạt ngưỡng 280 ± 30 mPa.s) tối ưu cho từng tỷ lệ lignin đã được thiết lập một cách hệ thống. Bộ thông số này xác lập cơ sở khoa học cốt lõi phục vụ trực tiếp công tác thiết kế cấp phối và kiểm soát chế độ nhiệt trong quá trình sản xuất hỗn hợp bê tông nhựa.

Việc tận dụng lignin từ phụ phẩm ngành công nghiệp giấy không chỉ mang lại hiệu quả kỹ thuật trong việc cải thiện chất lượng hạ tầng giao thông mà còn góp phần giảm thiểu chất thải công nghiệp, bảo vệ môi trường và thúc đẩy mô hình kinh tế tuần hoàn tại Việt Nam.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1]. I. Pérez, A. R. Pasandín, J. C. Pais, P. A. A. Pereira, Feasibility of Using a Lignin-Containing Waste in Asphalt Binders, Waste and Biomass Valorization, 11 (2020) 3021–3034. <https://doi.org/10.1007/s12649-019-00590-4>
- [2]. A. Pascoal, A. Almeida, S. Capitão, L. Picado-Santos, Improvement of Warm-Mix Asphalt Concrete Performance with Lignin Obtained from Bioethanol Production from Forest Biomass Waste, Materials, 16 (2023) 7339. <https://doi.org/10.3390/ma16237339>
- [3]. Chuyên trang Giao thông, Nguyên liệu tự nhiên sẽ khiến cho đường xá thân thiện môi trường. <https://giaothong.tapchixaydung.vn/nguyen-lieu-tu-nhien-se-khiến-cho-duong-xa-than-thien-moi-truong-1831805.htm>, 2015, (truy cập ngày 06/10/2026).

- [4]. P. A. Landa, R. J. A. Gosselink, Lignin-based bio-asphalt, International Patent Publication WO2019092278A1, 16 May 2019. <https://patents.google.com/patent/WO2019092278A1/en>
- [5]. E. Gaudenzi, L. P. Ingrassia, F. Cardone, X. Lu, F. Canestrari, Investigation of unaged and long-term aged bio-based asphalt mixtures containing lignin according to the VECD theory, Materials and Structures, 56 (2023) 82. <https://doi.org/10.1617/s11527-023-02160-6>
- [6]. E. Gaudenzi, F. Canestrari, X. Lu, F. Cardone, Performance Analysis of Bio-Based Asphalt Mixtures Containing Lignin, European Transport/Trasporti Europei, 91 (2023) 1–12. <https://doi.org/10.48295/ET.2023.91.1>
- [7]. S. Mastrolitti, E. Borsella, A. Giuliano, M. T. Petrone, I. De Bari, R. J. A. Gosselink, G. van Erven, E. Annevelink, K. S. Triantafyllidis, H. Stichnothe, Sustainable Lignin Valorization: Technical Lignin, Processes and Market Development, IEA Bioenergy Task 42 Technical Report, IEA Bioenergy, 2021. <https://task42.ieabioenergy.com/publications/sustainable-lignin-valorization/>
- [8]. H. Yao, Y. Wang, J. Liu, M. Xu, P. Ma, J. Ji, Z. You, Review on Applications of Lignin in Pavement Engineering: A Recent Survey, Frontiers in Materials, 8 (2022) 803524. <https://doi.org/10.3389/fmats.2021.803524>
- [9]. P. M. S. G. Luz, C. R. Ziegler, A. M. G. D. Mendonça, J. K. G. Rodrigues, Rheological evaluation of pg 64–22 asphalt binder modified with lignin of pinus and eucalyptus woods, Materials and Structures, 54 (2021) 166. <https://doi.org/10.1617/s11527-021-01757-z>
- [10]. R. Ghabchi, Effect of Lignin Type as an Additive on Rheology and Adhesion Properties of Asphalt Binder, Solids, 3 (2022) 603–619. <https://doi.org/10.3390/solids3040038>
- [11]. C. Xu, D. Wang, S. Zhang, E. Guo, H. Luo, Z. Zhang, H. Yu, Effect of Lignin Modifier on Engineering Performance of Bituminous Binder and Mixture, Polymers, 13 (2021) 1083. <https://doi.org/10.3390/polym13071083>
- [12]. L. M. Coelho, B. Z. Marchi, B. F. de A. F. Cardoso, P. H. P. M. da Silveira, A. C. R. Guimarães, S. N. Monteiro, Characterization of 30/45 asphalt binder modified with kraft lignin in relation to short-term aging, Contribuciones a las Ciencias Sociales, 17 (2024) e9138. <https://doi.org/10.55905/revconv.17n.8-059>
- [13]. A. Khadim, N. Ahmad, Evaluating the effect of paper waste lignin in hot mix asphalt, Engineering Research Express, 6 (2024) 025105. <https://doi.org/10.1088/2631-8695/ad3f72>
- [14]. S. S. Ahmed, A. A. Hamdoon, The use of lignin in the rheological modification of Dura asphalt, Journal of Education and Science, 29 (2020) 22–41. <https://doi.org/10.33899/edusj.2020.126782.1055>
- [15]. Ö. Genç, B. Varlı Bingöl, Investigation of the Effect of Lignin on Aged Bitumen, Karadeniz Fen Bilimleri Dergisi, 14 (2024) 1748–1757. <https://doi.org/10.31466/kfbd.1458442>
- [16]. G. M. Fayzrakhmanova, S. A. Zabelkin, A. N. Grachev, V. N. Bashkirov, A study of the properties of a composite asphalt binder using liquid products of wood fast pyrolysis, Polymer Science, Series D, 9 (2016) 181–184. <https://doi.org/10.1134/S1995421216020052>
- [17]. M. Cai, C. Peng, C. Cheng, Study on the Rheological Properties of Formic Acid Lignin Modified Asphalt, Buildings, 13 (2023) 655. <https://doi.org/10.3390/buildings13030655>
- [18]. I. Pérez Pérez, A. M. Rodríguez Pasandín, J. C. Pais, P. A. A. Pereira, Use of lignin biopolymer from industrial waste as bitumen extender for asphalt mixtures, Journal of Cleaner Production, 220 (2019) 87–98. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.02.082>
- [19]. A. Khater, D. Luo, M. Abdelsalam, J. Ma, M. Ghazy, Comparative Life Cycle Assessment of Asphalt Mixtures Using Composite Admixtures of Lignin and Glass Fibers, Materials, 14 (2021) 6589. <https://doi.org/10.3390/ma14216589>
- [20]. A. K. Asad, A. H. Albayati, The Feasibility of Using Lignin as Modifier for Asphalt Cement, Journal of Engineering, 30 (2024) 112–128. <https://doi.org/10.31026/j.eng.2024.12.08>

- [21]. J. Read, D. Whiteoak, The Shell Bitumen Handbook, 5th edition, Thomas Telford, London, 2003. <https://doi.org/10.1680/sbh.32200>
- [22]. Fu, X., He, M., Liu, Y., 2021. Research on Short-term Aging of Lignin Modified Asphalt. *E3S Web of Conferences*, Vol. 233, Article 01125. IAECST 2020. EDP Sciences. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202123301125>
- [23]. J. Hensley, A. Palmer, Establishing Hot Mix Asphalt Mixing and Compaction Temperatures at the Project Level, *Asphalt*, Spring/Summer (1998) 19–23.
- [24]. Asphalt Institute, Determining Laboratory Mixing and Compaction Temperatures, Asphalt Institute Technical Advisory Committee, 2016. <https://www.asphaltinstitute.org/technical-resources/determining-laboratory-mixing-and-compaction-temperatures/>, (accessed 15 April 2026).